



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALANE VIEIRA GOMES

**PROJETO DE UM REATOR DE FLUXO CONTÍNUO DE ELETROCOAGULAÇÃO
EM ESCALA DE BANCADA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES SANEANTE
DOMISSANITÁRIOS**

RECIFE
2023

ALANE VIEIRA GOMES

**PROJETO DE UM REATOR DE FLUXO CONTÍNUO DE ELETROCOAGULAÇÃO
EM ESCALA DE BANCADA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES SANEANTE
DOMISSANITÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco como requisito
parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof^ª. Dr. Janaina Moreira de Meneses.

RECIFE

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Gomes, Alane Vieira.

Projeto de um reator de fluxo contínuo de eletrocoagulação em escala de bancada para o tratamento de efluentes saneante domissanitários / Alane Vieira Gomes. - Recife, 2023.

58p. : il., tab.

Orientador(a): Janaina Moreira de Meneses

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Eletrocoagulação. 2. PDP. 3. Metodologia de fases. 4. Desenvolvimento de produto. 5. Indústria saneante. I. Meneses, Janaina Moreira de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Ao 18.º dia do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e três, às 13:30 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Projeto de um reator de fluxo contínuo de eletrocoagulação em escala de bancada para o tratamento de efluentes saneante domissanitários**, elaborado pela aluna **Alane Vieira Gomes**, matrícula 20170008644, composta pelos avaliadores Profa. **Janaina Moreira de Meneses** (orientadora), Prof. **Francisco Fernando Roberto Pereira** (avaliador) e Profa. **Marcele Elisa Fontana** (avaliadora). Após a exposição oral do trabalho, a candidata foi arguida pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua Aprovação _____, atribuindo-lhe a média 8,0 _____, julgando-a apta(x) / inapta() à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientadora: Prof. Janaina Moreira de Meneses Nota: 8,0

Assinatura



Documento assinado digitalmente
JANAINA MOREIRA DE MENESES
Data: 20/09/2023 10:57:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador
Interno:

Prof. Francisco Fernando Roberto Pereira

Nota: 8,0

Assinatura



Documento assinado digitalmente
FRANCISCO FERNANDO ROBERTO PEREIRA
Data: 20/09/2023 12:52:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliadora
Interna:

Profa. Marcelle Elisa Fontana

Nota: 8,0

Assinatura



Documento assinado digitalmente
MARCELE ELISA FONTANA
Data: 28/09/2023 13:06:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Recife, 18 de setembro de 2023.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

Dedico esse trabalho aos meus pais, Djanira e Edival, que sempre acreditaram em mim e moveram o mundo para que eu pudesse estar aqui hoje.

RESUMO

A eletrocoagulação é um método eletroquímico de tratamento de efluentes e pode ser aplicada em diversos tipos de indústrias. É uma técnica que trata o efluente antes que o mesmo seja despejado no sistema de esgoto que, pela falta de infraestrutura adequada, pode levar a poluição de rios, mares e/ou lençóis freáticos. Em virtude disso, para esse trabalho, foi proposto um design de um reator de fluxo contínuo de eletrocoagulação em escala de bancada para o tratamento de efluentes da indústria de saneantes. A metodologia deste trabalho foi realizada com o auxílio do Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) dividindo em três etapas de projeto e resultando em um reator que atende as necessidades, requisitos e especificações-meta atribuídas. Foram identificados formas de remover o lodo do efluente após o tratamento, foi estudada a melhor forma de fazer a recirculação do efluente dividindo o reator em três câmeras diferentes e adjacentes, como também a maneira mais ergonômica para o encaixe dos eletrodos no reator. O reator foi desenvolvido nas três primeiras etapas do PDP, os suportes foram impressos e os eletrodos cortados para teste de encaixe; ambos funcionaram como o esperado.

Palavras-chave: Eletrocoagulação, PDP, Metodologia de fases, Desenvolvimento de produto, Indústria saneante.

ABSTRACT

Electrocoagulation is an electrochemical method for wastewater treatment and can be applied in various types of industries. It is a technique that treats the effluent before it is discharged into the sewage system, which, due to a lack of adequate infrastructure, can lead to pollution of rivers, seas, and/or groundwater. As a result, for this work, a bench-scale continuous flow electrocoagulation reactor design was proposed for treating wastewater from the sanitation industry. The methodology of this work was carried out with the assistance of the Product Development Process (PDP), divided into three design stages, resulting in a reactor design that meets the assigned needs, requirements, and target specifications. Methods for removing sludge from the effluent after treatment were identified, the best way to circulate the effluent by dividing the reactor into three different adjacent chambers was studied, as well as the most ergonomic way to fit the electrodes into the reactor. The reactor was developed in the first three stages of the PDP, supports were 3D printed, and electrodes were cut for fit testing; both performed as expected.

Keywords: Electrocoagulation, PDP, Phase Methodology, Product Development, Sanitation Industry, Innovation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 Objetivo geral.....	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA DE ELETROCOAGULAÇÃO.....	13
2.2 PARÂMETROS ASSOCIADOS AO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO.....	15
2.3 TIPOS DE REATORES DE ELETROCOAGULAÇÃO.....	17
2.4 APLICAÇÃO DE ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES..	18
2.5 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO.....	19
3 METODOLOGIA.....	22
3.1 Projeto Informacional.....	22
3.2 Projeto Conceitual.....	23
3.3 Projeto Preliminar.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
4.1 PROJETO INFORMACIONAL.....	25
4.1.1 Pesquisa Por Produtos Similares.....	25
4.1.1.1 Reator para tratamento efluente de purificação do biodiesel.....	25
4.1.1.2 Reator para tratamento de efluentes líquidos das indústrias de laticínios.....	26
4.1.1.3 Reator para tratamento de efluente de indústria cosmética.....	27
4.1.1.4 Reator para pós-tratamento de águas residuais municipais.....	28
4.1.2 Necessidades, Requisitos e Especificações-Meta.....	29
4.2 PROJETO CONCEITUAL.....	31
4.2.1 Subsistema Entrada do Efluente (EE).....	32
4.2.2 Subsistema Saída do Efluente (SE).....	33
4.2.3 Subsistema Remoção do Lodo (RL).....	34
4.2.4 Subsistema Suporte dos Eletrodos (S).....	35
4.2.5 Resultado do Projeto Conceitual.....	36
4.3 PROJETO PRELIMINAR.....	37
4.3.1 Configuração 1 do Produto.....	38
4.3.1.1 Esboço do subsistema entrada de efluente.....	38
4.3.1.2 Esboço do subsistema saída de efluente.....	39
4.3.1.3 Esboço do subsistema remoção do lodo.....	39
4.3.1.4 Esboço do subsistema suporte dos eletrodos.....	40
4.3.2 Carcaça.....	41
4.3.3 Eletrodo.....	42
4.3.4 Processos de Fabricação.....	43
4.3.5 Montagem do Produto.....	44

4.3.6 Suporte Impresso.....	46
4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	46
5. CONCLUSÕES.....	47
6.1 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	47
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
APÊNDICE A.....	55
APÊNDICE B.....	56
APÊNDICE C.....	57
APÊNDICE D.....	58

1 INTRODUÇÃO

No balanço de 2019 da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), órgão responsável pela gestão dos recursos hídricos no país, 93 trilhões de litros de água são retirados anualmente das fontes, destes, 70% da água retirada no Brasil é usada para atender as demandas dos diversos setores, como: irrigação de lavouras (49,8%), abastecimento humano urbano (24,3%), atividades industriais (9,7%), uso animal (8,4%), termelétricas (4,5%), mineração (1,7%) e humano rural (1,6%), os outros 30% representa a evaporação líquida por usos múltiplos.

No Brasil, por ser um dos países mais industrializados no mundo, nos últimos anos o percentual de indústrias aumentou, com isso, aumentou também a demanda hídrica industrial, que ocupa a terceira posição entre os setores, que mais consomem (ANA, 2019).

Sendo um dos setores que mais cresce, com um aumento de 70% nos últimos 15 anos (ABIPLA, 2020), o aumento da produção de produtos de limpeza, aumenta consequentemente a geração de resíduos. Esses efluentes são lançados diretamente no esgoto e provocam grande degradação ambiental, pois, normalmente, suas toxicidades estão associadas à presença de compostos recalcitrantes e emergentes em sua composição (Assalin; Durán, 2007).

A ANVISA na resolução N° 336 de 1999, classificou os produtos saneantes domissanitários, produtos de limpeza, quanto à finalidade de emprego, produtos para limpeza em geral, com ação antimicrobiana, biológicos à base de microrganismos, e produtos desinfestantes. Os produtos de limpeza são formulados contendo água, componente ativo e componente aditivo que melhoram a ação do surfactante ou tensoativo.

Já os desinfetantes são caracterizados pela Lei N° 6360 de 1976 como produtos destinados a destruir, indiscriminada ou seletivamente, micro-organismos, quando aplicados em objetos inanimados ou ambientes. Atualmente, os tensoativos utilizados nos desinfetantes são os quaternários de amônio por possuírem elevada efetividade biocida. Os sais de amônio quaternário são solúveis em água e possuem baixa biodegradabilidade, conferindo um risco potencial de bioacumulação em ambientes aquáticos, que pode contribuir significativamente para contaminação da fauna e flora.

Segundo Pinheiro (2014), o descarte dos efluentes saneante domissanitário, são prejudiciais ao meio ambiente, pois formam espuma que inibem ou paralisam os processos de depuração natural ou artificial, concentram impurezas e disseminam bactérias ou vírus, diminui a absorção de oxigênio e sua dissolução, além de perturbar o seu transporte através das membranas dos organismos aquáticos, aumenta a concentração de fosfatos que favorecem a eutrofização.

Os tratamentos de efluentes industriais dependem da natureza dos poluentes a serem removidos e da composição do efluente, funcionando conforme as características físicas, químicas e biológicas. Com a atenção atual da preservação de fontes de água potável e com a legislação ambiental cada vez mais rigorosa, as tecnologias eletroquímicas voltaram a ter seu papel de importância no tratamento de efluentes e dentro desse rol de tecnologias eletroquímicas a eletrocoagulação está incluída.

A eletrocoagulação possui as seguintes vantagens: ser uma técnica mais limpa para o meio ambiente, não comprometer a qualidade da água tratada, geração mínima de lodo, remoção ampla de diversos poluentes e simplicidade de confecção e operação (Meneses, 2011), além de não ser necessário o uso de aditivos químicos (Darban, 2020). É um método promissor e se mostrou eficaz em diversos setores industriais como o tratamento de efluentes de abatedouros de aves (Módenes, 2017), e efluente de lavanderias (Marchesan, 2022).

O projeto baseia-se em reatores já divulgados, propondo um mecanismo para o fluxo ser contínuo de maneira que a espuma formada no processo possa ser retirada, bem como possuir um sistema de agitação para o efluente durante o processo para que todas as etapas do tratamento possam ser realizadas no mesmo reator e o mesmo possa ser submetido para fabricação futuramente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Projetar a geometria tridimensional de um reator eletroquímico de fluxo contínuo visando o tratamento de efluentes saneante domissanitários.

1.1.2 Objetivos específicos

- Compreender sobre reatores de eletrocoagulação de fluxo contínuo;
- Definir o escopo do reator usando as necessidades dos usuários;
- Elaborar plano de desenvolvimento do produto que atenda às necessidades;
- Apresentar o design inicial do reator em ferramenta CAD.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

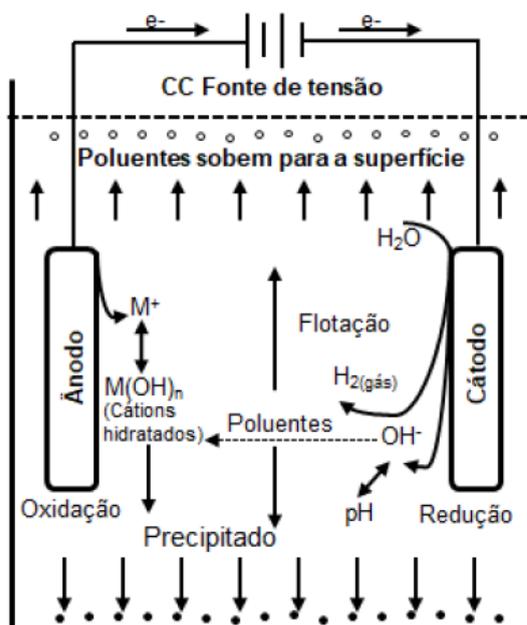
2.1 FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA DE ELETROCOAGULAÇÃO

Segundo Meneses (2011), a eletrocoagulação trata-se de um processo eletroquímico onde a formação dos agentes coagulantes ocorre por meios de reações eletroquímicas em um reator eletroquímico, substituindo os aditivos coagulantes químicos utilizados no processo de coagulação convencional. Na eletrocoagulação os agentes coagulantes são gerados *in situ*.

Combinando as técnicas de coagulação, eletroquímica e flotação, uma unidade simples de eletrocoagulação geralmente consiste em uma célula eletrolítica com um ânodo e um cátodo de metal, conectados externamente a uma fonte de alimentação DC e os mesmos são imersos numa solução a ser tratada. Os eletrodos de alumínio e ferro são os mais usados para as células de eletrocoagulação, pois possuem grande disponibilidade, não são tóxicos e são comprovadamente confiáveis (Moussa et al., 2017).

Conforme ilustrado na Figura 1, o alumínio pode ser usado como eletrodo de sacrifício, onde a partir da aplicação do potencial elétrico são gerados no ânodo os íons Al^{3+} que são eficientes coagulantes para a floculação de partículas, estes sofrem reações, e os íons alumínio hidrolisados podem formar vários complexos de Al-O-Al-OH que podem quimicamente adsorver poluentes (Chen, 2004).

Figura 1: Diagrama esquemático de uma célula de eletrocoagulação de dois eletrodos em escala de bancada.



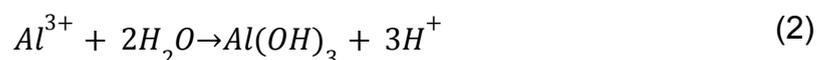
Fonte: Mollah et al. (2004).

O alumínio é liberado devido a voltagem inserida no sistema. Durante o processo eletrolítico ocorre a corrosão dos eletrodos (perda de massa). O cátodo se dissolve devido ao ataque químico pelos íons hidroxila gerados durante a redução da água. A presença da hidroxila aumenta o pH do meio, alcançando um pH final alcalino, conduzindo a um consumo maior do cátodo devido ao ataque das hidroxilas. O pH alcalino induz o ataque químico no cátodo de Al, devido à evolução do hidrogênio (Pertile, 2013).

A oxidação do alumínio está descrita na reação vista na Equação (1):



Os íons de alumínio formados no ânodo reagem com os íons de hidroxila gerados no cátodo, formando o agente coagulante, hidróxido de alumínio, composto responsável por remover as impurezas do efluente, em condições ácidas da Equação (2):



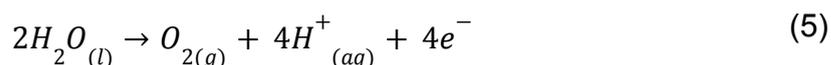
Em condições alcalinas visto na Equação (3):



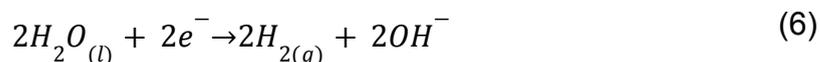
Além de outros complexos de alumínio que podem ser formados durante o processo de eletrocoagulação pelas reações espontâneas da Equação (4):



Na superfície do ânodo, água é hidrolisada como mostra a Equação (5):



Já na superfície do cátodo, a água também é hidrolisada, mas em gás hidrogênio e hidroxilas na Equação (6):



O processo de eletrocoagulação descrito por Mollah et al. (2004) apresenta três estágios, primeiro há formação do coagulante pela oxidação eletrolítica do “eletrodo de sacrifício”; depois desestabilização dos contaminantes, suspensão das partículas de quebra de emulsões e por fim a agregação das fases desestabilizadas para formar flocos. Assim que a reação continua, grandes flocos se formam arrastando os sólidos, metais pesados, óleos e graxas e outros. Finalmente os flocos são removidos da água e depois ocorre a filtração e purificação da mesma.

2.2 PARÂMETROS ASSOCIADOS AO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO

Para se obter uma efetiva remoção de poluentes em um efluente a ser tratado com a eletrocoagulação, algumas condições operacionais são necessárias. O uso desses parâmetros otimizados pode levar simultaneamente a uma remoção eficiente

de efluentes em um tempo operacional relativamente curto com os menores custos e consumo de energia possíveis (Brahmi et. al, 2019). Segundo Krystynik (2017) os fatores que afetam fortemente o processo de eletrocoagulação são:

- **Densidade de corrente:** É um dos parâmetros importantes quando se trata do processo de eletrocoagulação. É a corrente por área dos eletrodos que determina a quantidade de íons metálicos que eles liberam e pode ser controlada diretamente para determinar a taxa das reações eletroquímicas (Finger, 2018).
- **Efeito do pH inicial:** O pH é um parâmetro operacional crítico (Naje et al., 2016). O pH da solução de reação muda durante o processo de eletrocoagulação, e o pH final do efluente realmente afeta o desempenho geral do tratamento (Kabdaşli et al., 2012).
- **Tipo de fonte de alimentação:** O tipo de fonte de alimentação é geralmente de corrente contínua, seu uso provoca a oxidação do ânodo e forma uma camada de óxido na passivação do cátodo, geralmente causando um aumento do potencial passivo, portanto, a um maior consumo de energia, bem como a uma diminuição do fluxo de corrente entre os eletrodos e a eficiência do processo em geral (Moussa et al., 2017).
- **Efeito da velocidade de agitação:** Tem um papel central na eficiência do processo da eletrocoagulação. Diferentes velocidades são analisadas e a partir disso observa se a remoção do efluente, se é baixa, moderada ou boa. Salienta-se que uma agitação excessiva causa o rompimento dos flocos e o aumento do consumo de energia, elevando os custos de operação (Brahmi et al., 2019).
- **Efeito da variação da relação área-superfície-volume:** É a área de superfície ativa da relação de volume da solução a ser tratada, outro dos fatores muito importantes de um processo. Para haver uma diminuição no consumo da densidade de corrente, deve haver um aumento na área dos eletrodos.
- **O espaçamento ânodo-cátodo:** A produção abundante de íons de alumínio e a dissolução dos eletrodos estão fortemente relacionadas à eficiência da eletrocoagulação (Mollah et al., 2001; Modirshahla et al.,

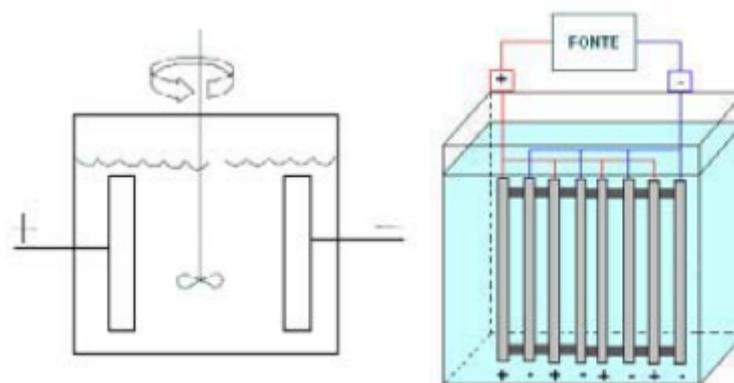
2008), esta é reforçada com a adição de uma série de placas para aumentar a área de superfície ativa.

- **Tempo de eletrólise:** Está diretamente ligado a eficiência de remoção dos contaminantes (Darban et al., 2020). Tendo dependência de demais parâmetros associadas, como, por exemplo, a distância entre os eletrodos, que quanto menor a distância, menos tempo é necessário para que o processo de EC atinja a eficiência máxima, e portando, menor será o custo operacional (Aityoub et al., 2020).
- **Eletrólito de suporte:** É responsável por aumentar a condutividade da solução que no que lhe concerne diminui o consumo de energia, simultaneamente, evitando o efeito sobre os íons de migração e influenciando a cinética de certas reações eletroquímicas que ocorrem durante o processo (Garcia-Segura et al., 2017).

2.3 TIPOS DE REATORES DE ELETROCOAGULAÇÃO

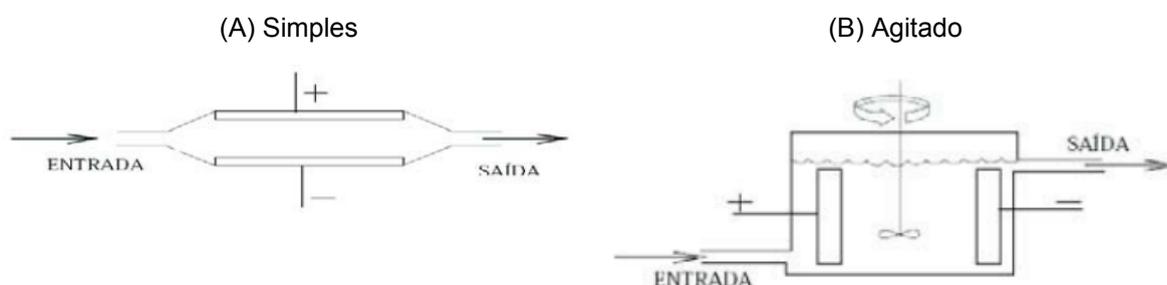
A engenharia eletroquímica empenha-se em desenvolver modelos mais elaborados de reatores eletroquímicos, tendo como foco o design, caracterização, operação e processos onde serão utilizados, como determinações analíticas e processos de tratamento ambiental (Wash et al., 1998 apud Vasconcelos, 2002).

Segundo Ramalho (2008), diversas aplicações eletroquímicas estão sendo desenvolvidas, permitindo a extensão da configuração tradicional e possibilitando trabalhar com uma grande faixa de variedade na configuração dos reatores. Dois deles são o reator em batelada conforme ilustrado na Figura 2, onde o sistema trabalha de maneira descontínua e tem, em cada ciclo, um volume de efluente fixo.

Figura 2: Reator para uso em batelada.

Fonte: Oliveira et al. (2003).

O segundo é o reator de modo contínuo, observado na Figura 2, neste, o processo de eletrocoagulação acontece de maneira ininterrupta, o sistema é abastecido à medida que o produto for descarregado. A alimentação contínua do efluente no reator de EC leva às condições de estado estacionário (pseudo), sendo a quantidade de coagulante um requisito essencialmente fixo (Pertile, 2014).

Figura 3: reator de fluxo contínuo.

Fonte: Oliveira et al. (2003).

2.4 APLICAÇÃO DE ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

A eletrocoagulação mostrou-se capaz de remover de maneira eficaz e sem gastos exorbitantes diversos efluentes. Por ser de simples confecção e operação e possuir uma taxa de reação rápida, esse método vem sendo aplicado e estudado de maneira a otimizá-lo, minimizando o consumo de energia e maximizando as taxas de remoção dos poluentes (Palahouanea et al., 2015).

Exemplificando o emprego do método, Módenes (2017) utilizou um reator em

batelada para tratamento de efluentes de abatedouro de aves onde os parâmetros cor e turbidez atenderam a legislação e o DQO foi removido em uma faixa de 92%. Dentro do custo operacional, a eletrocoagulação também se mostrou vantajosa nesse estudo devido ao baixo custo.

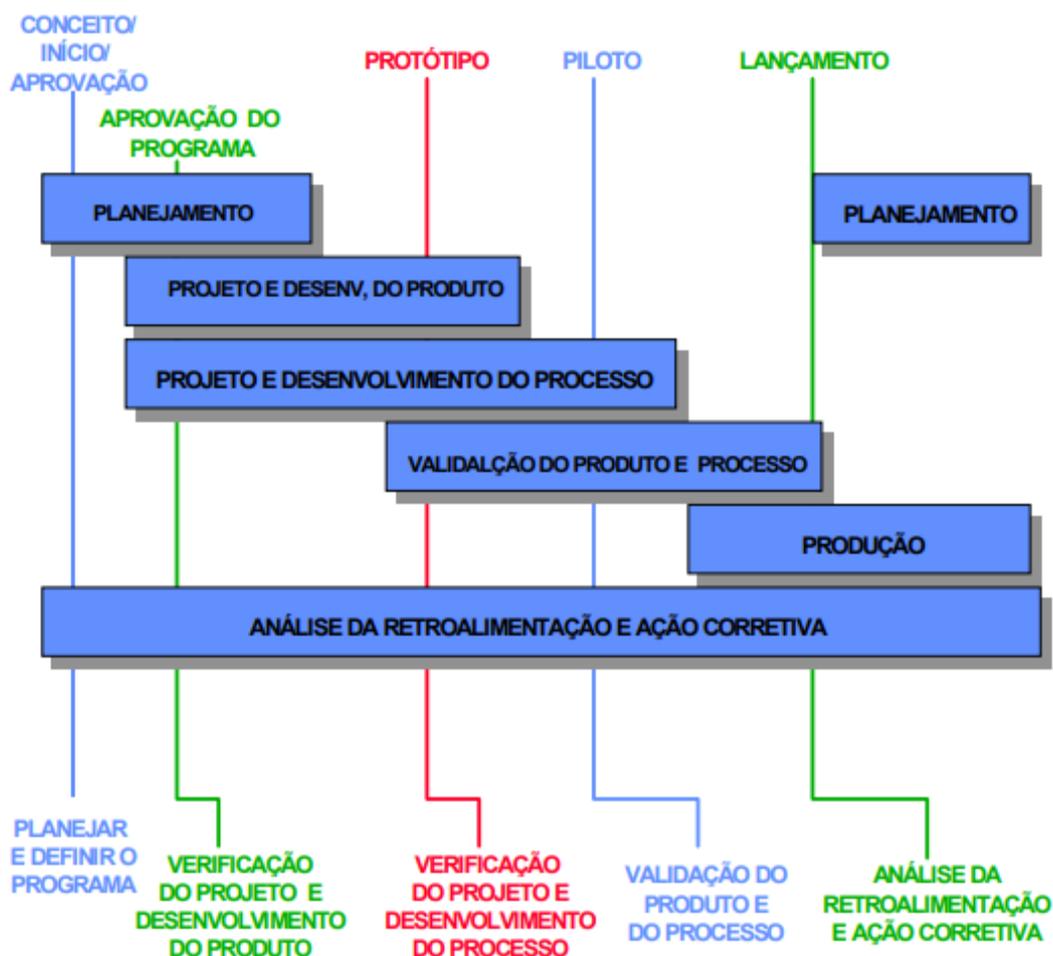
Marchesan (2022) usou um reator de fluxo contínuo para tratar efluentes de lavanderia que se mostrou eficiente no tratamento, uma vez que a maioria dos parâmetros enquadrou-se nos requisitos de lei, exceto o DBO que necessitaria de um complemento como o uso de uma unidade de filtração, e o efluente poderá ser reutilizado.

O método de tratamento de efluentes por eletrocoagulação é um dos mais promissores e amplamente usada para tratar diversos efluentes, em alguns casos um tratamento complementar é necessário, mas os resultados são satisfatórios e o método ainda surge como um tratamento ecológico visto que não requer aditivos químicos adicionais e apresenta mínima geração de lodo (Aswathy et al., 2016).

2.5 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

Para Paulo Caroli (2019) é necessário alinhar e definir os objetivos do produto antes de “sair fazendo”, detalhar quais as estratégias serão tomadas no desenvolvimento do mesmo e qual o seu escopo, na Figura 4 a seguir é possível verificar as etapas do processo de desenvolvimento de produtos.

Figura 4: Etapas do processo de desenvolvimento de produtos



Fonte: Gonzalez (1999).

Durante o planejamento, faz-se necessário montar um conceito de um produto que permita a sua concretização, desde o conceito até a aprovação da estratégia para desenvolvê-lo. A partir do conceito, as previsões da estratégia de como abordá-lo são concebidas e verificadas se factíveis ou não por meio de uma pesquisa e avaliação de produtos de mercados semelhantes, a fim de entender sua necessidade e possíveis melhorias.

Ao decorrer do desenvolvimento do processo do novo produto, os protótipos são criados para verificação dos conceitos aplicados antes que o piloto, com as especificações-meta, seja lançado para validação de processo e, por fim, a produção do produto.

Tendo a visão clara do produto é possível montar um roteiro para o desenvolvimento dele. O desenvolvimento do produto é um processo multidisciplinar que envolve várias áreas cujo objetivo é conceber um produto produzível a partir da

função desejada, capaz de satisfazer as necessidades das pessoas (Carpes Jr, 2014).

O desenvolvimento de produto é um dos mais importantes processos responsáveis pela agregação de valor aos negócios (Takahashi e Takahashi, 2007). A primeira fase do desenvolvimento de um produto é a definição das características desejadas, essa fase é conhecida como projeto informacional. Nela uma análise das necessidades do consumidor é realizada para descrever as principais ideias do produto, após uma busca por produtos similares, uma lista de requisitos é elaborada e depois transformada em especificações.

Sabendo as especificações necessárias ao produto, a segunda fase, nomeada de projeto conceitual, tem início. Os produtos similares são divididos em subsistemas comuns para facilitar a visualização de maneira a auxiliar a visualização das informações técnicas iniciais e aproximadas e na concepção das ideias ou soluções alternativas.

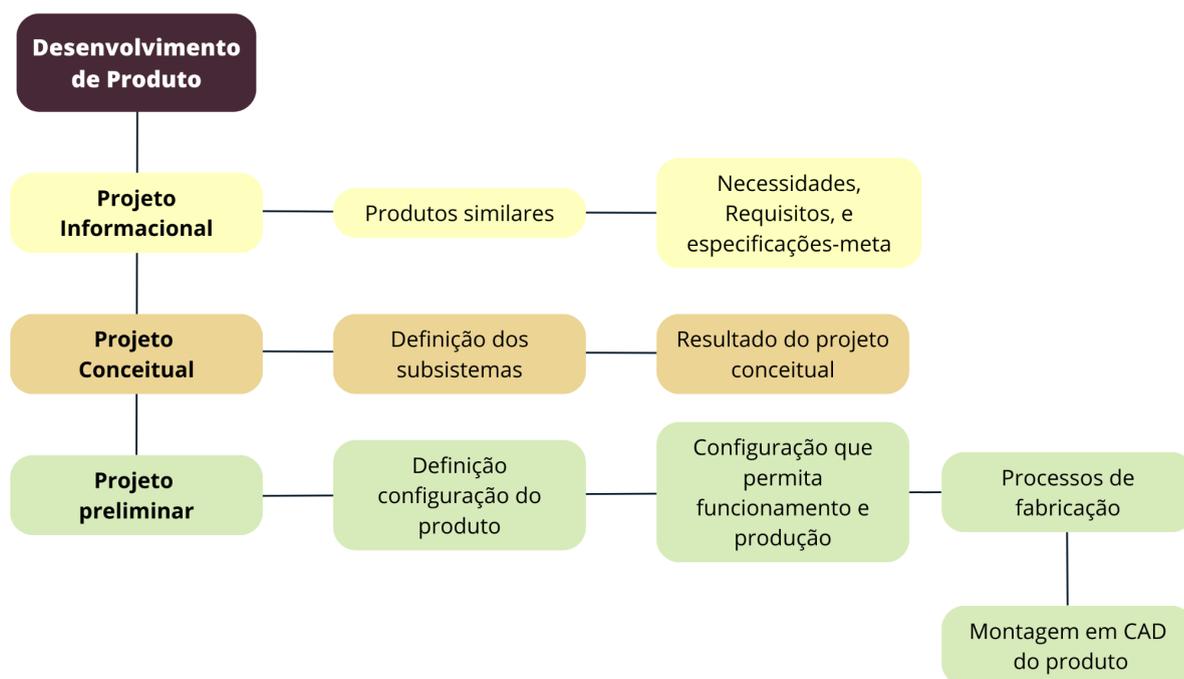
Nas demais fases do desenvolvimento de um produto, o conceito desenvolvido por meio das especificações será configurado, montado, testado e melhorado antes de ser validado para ser produzido e liberado para o público geral.

3 METODOLOGIA

Esse trabalho foi construído a partir de uma pesquisa de natureza descritiva, abordando diversos modelos de reatores de fluxo contínuo presentes na literatura de maneira a descrever e desenvolver um reator deste tipo para tratamento de efluentes da indústria saneante.

As etapas desenvolvidas neste trabalho seguiram o fluxo descrito por Rozenfeld (2006) sobre Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) para se obter ao final um reator de eletrocoagulação de fluxo contínuo para tratar efluentes domissanitários. As etapas a serem seguidas neste trabalho estão resumidas na Figura 5.

Figura 5: Metodologia de fases para desenvolvimento de produto



Fonte: Autor (2023).

3.1 Projeto Informacional

A pesquisa descritiva, que iniciou com a construção de um referencial bibliográfico sobre reatores de eletrocoagulação. O primeiro passo foi compreender o funcionamento de um reator de eletrocoagulação, realizando uma revisão

bibliográfica em artigos, dissertações e teses sobre o tema eletrocoagulação para tratamento de efluentes. A partir destas leituras foi construído no Tópico 4.1 uma seleção de tipos de reatores de eletrocoagulação, disposição e suporte dos eletrodos, estudo sobre os parâmetros operacionais e fundamentais para construção do produto, e nos resultados foi discutidos as vantagens e desvantagens de quatro tipos de reatores avaliando sua geometria e sistema de funcionamento.

A ideia do produto foi concebida durante pesquisas de iniciação científica no LATECLIM - UFPE. Com o auxílio das pesquisas em laboratório e de artigos científicos sobre reatores de fluxo contínuo para eletrocoagulação, foram analisadas e reunidas as necessidades do mesmo, agrupando as características e especificações-meta necessárias para que o reator a ser desenvolvido funcionasse de maneira satisfatória atendendo os requisitos demarcados.

3.2 Projeto Conceitual

A partir do estudo preliminar foi possível obter as especificações-metas necessárias para o desenvolvimento do produto. Desta forma foram definidos princípios de solução para modelar funcionalmente o reator e dividindo-o em subsistemas funcionais baseado em quatro reatores de fluxo contínuo pesquisados em artigos científicos para desenvolver alternativas de solução para cada um dos subsistemas que foram: entrada e saída do efluente, solução para remoção do lodo flotado e suporte dos eletrodos de forma que possa ocorrer a agitação do meio reacional. Desta forma foram construídas tabelas listando as vantagens e desvantagens que cada subsistema possui nos determinados reatores avaliados, e em seguida foram desenvolvidas alternativas de solução e por consequente a arquitetura de construção do reator com otimização dos subsistemas, levando em consideração a facilidade de fabricação e montagem.

3.3 Projeto Preliminar

Os subsistemas, definidos na etapa anterior, foram divididos de maneira independente, logo cada princípio de solução não tinha ligação direta com o outro, então foi adotada a configuração modular para esboçar cada subsistema de maneira separada. Nessa fase foram definidas as configurações que permitem o

funcionamento do produto e com o auxílio da ferramenta CAD Fusion 360, foram detalhados o design de cada subsistema e a montagem da carcaça do reator com a junção de todos os componentes e o corte do eletrodo para que o mesmo fosse encaixado no reator. Para finalizar todas as especificações do produto proposto por este trabalho, o reator foi montado no CAD. Apresentou-se a representação gráfica do reator, descrição completa das características físicas e funcionais, bem como descrições técnicas necessárias para construir, testar e operar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROJETO INFORMACIONAL

O projeto informacional é a primeira fase de desenvolvimento de um produto, quando são definidas as características desejadas. Dentre as tarefas desta fase, incluem-se, análise das necessidades do consumidor, a descrição das principais ideias do produto, a pesquisa por produtos com características similares ao desejado, a elaboração da lista de requisitos do produto e a transformação destes em especificações (Carpes Júnior, 2014).

4.1.1 Pesquisa Por Produtos Similares

Partindo da pesquisa bibliográfica, foram selecionados quatro trabalhos que utilizaram reatores de fluxo contínuo diferentes para atender ao seu objetivo, tratamento do efluente trabalhado por cada pesquisador, para servir como produtos similares e base para a idealização do reator de fluxo contínuo para o tratamento de efluentes da indústria domissanitária desenvolvido neste trabalho.

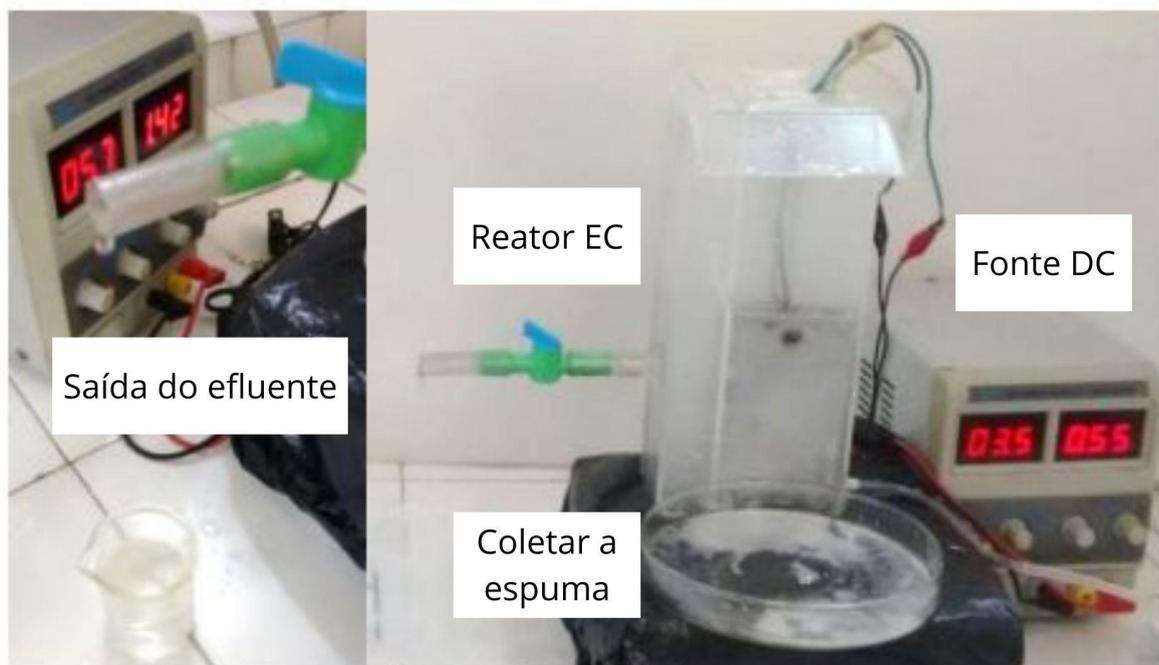
4.1.1.1 Reator para tratamento efluente de purificação do biodiesel

O reator desenvolvido por Fernandes (2016) é apresentado na Figura 6 para o tratamento da água utilizada para purificação do biodiesel resultante em efluentes contaminados que não devem ser expulsos diretamente na natureza. Usou um reator de fluxo contínuo em decorrência do grande volume que pode ser gerado durante o processo. O volume do reator eletroquímico foi dividido em duas câmaras racionais, evitando, assim, a contaminação do efluente tratado.

Trata-se de um reator retangular (conforme Figura 6) que possui dois orifícios conectados a mangueiras, um deles responsável pela entrada do efluente e o outro pela saída do mesmo. Não é fechado e possui uma calha na parte superior com uma inclinação de 25° para a retirada do lodo gerado durante o processo. Os eletrodos são encaixados na parte inferior e separados em uma distância 5 mm por espaçadores isolantes de placas de epóxido de 39 mm de comprimento e 14 mm de altura. Esse é um modelo simples e o lodo gerado escoar pela calha sendo

armazenado em uma placa de Petri e o efluente tratado é retirado com o auxílio de uma torneira e armazenado em um Becker.

Figura 6: Reator de fluxo contínuo para eletrofloculação do efluente da purificação do biodiesel



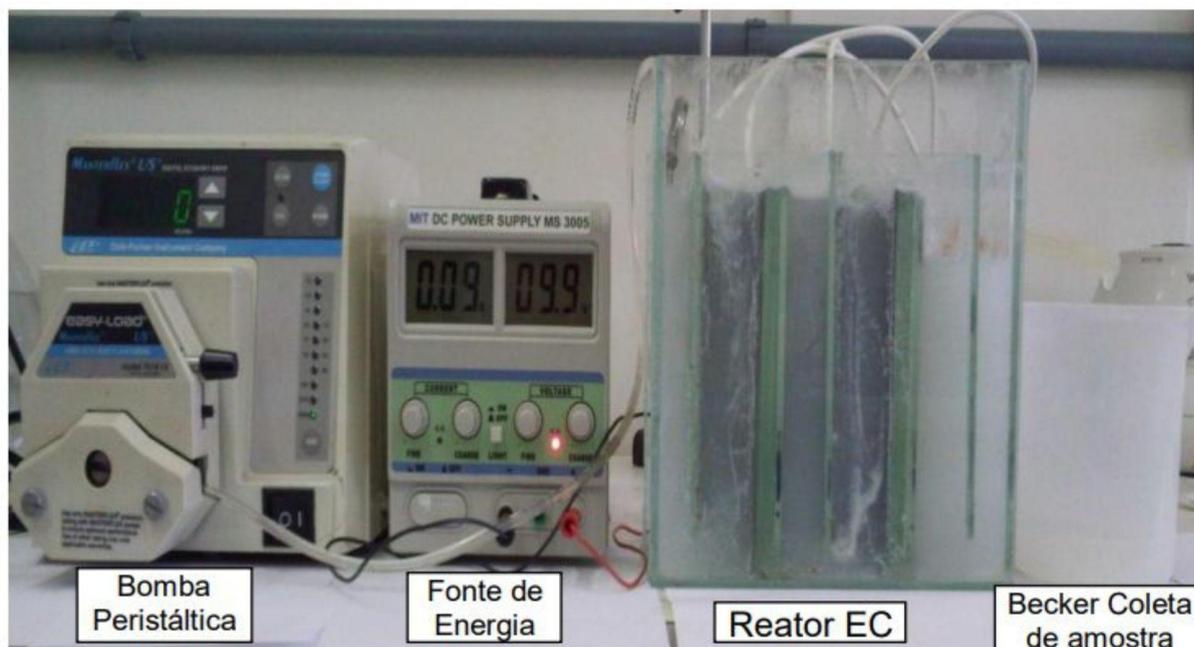
Fonte: Fernandes (2016).

4.1.1.2 Reator para tratamento de efluentes líquidos das indústrias de laticínios

Visando utilizar o método de eletrocoagulação em sistema contínuo para o tratamento de efluentes líquidos das indústrias de laticínios que possui em sua composição uma elevada concentração de matéria orgânica que podem alterar ciclos biológicos, especialmente a fotossíntese, Benazzi (2013) propôs o reator observado na Figura 7. O reator de fluxo contínuo foi eficiente e o processo mostrou ser viável no tratamento do efluente estudado.

Composto por um reator retangular (conforme a Figura 7), o sistema possui suporte para dois eletrodos de alumínio conectados em paralelo, separados a uma distância de 20 mm um do outro e fixos em um suporte de vidro na base do reator. O efluente a ser tratado entra pela parte superior do sistema que não possui tampa com o auxílio de uma bomba peristáltica e uma mangueira. Já o efluente tratado foi coletado em um Becker.

Figura 7: Aparato experimental do reator em fluxo contínuo de eletrocoagulação



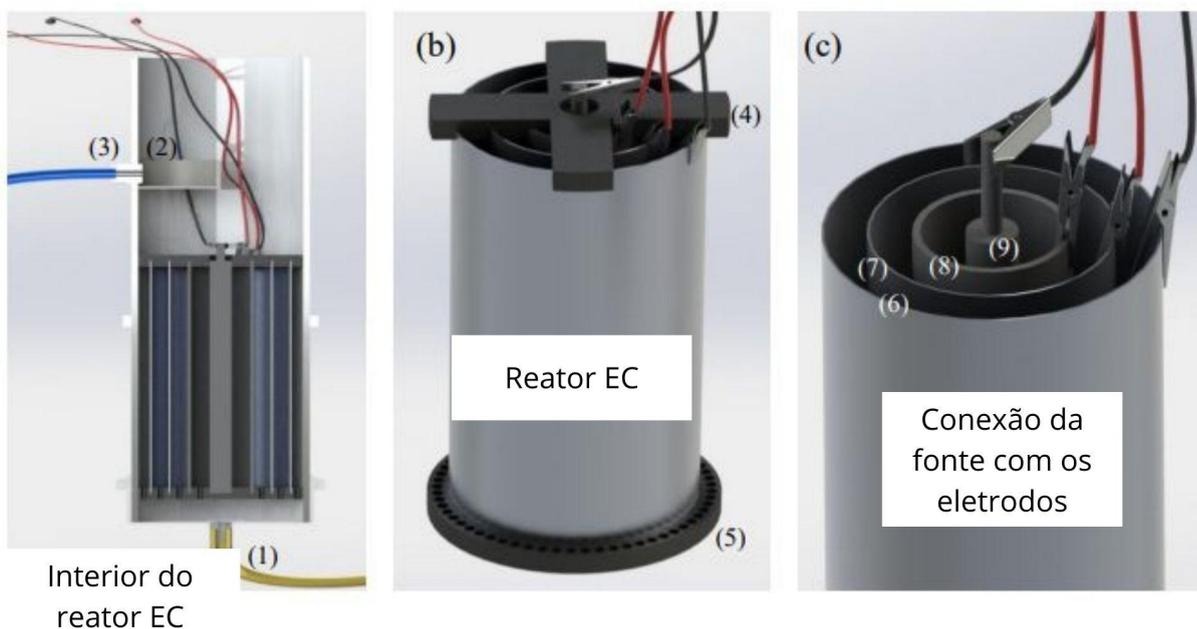
Fonte: Benazzi (2013).

4.1.1.3 Reator para tratamento de efluente de indústria cosmética

Tones (2020) fez uso de um reator eletroquímico fluxo contínuo, Figura 8, tratar o efluente advindo da indústria cosmética, os mesmos são considerados tóxicos e de baixa biodegradabilidade.

O módulo experimental do reator foi montado em um recipiente cilíndrico de maneira que o fluxo fosse ascendente e contínuo (conforme Figura 8). Os eletrodos estão espaçados a 2 mm um do outro e instalados na parte inferior. Na parte superior está um suporte em *nylon* em formato de cruz que mantém fixa a distância dos eletrodos e permite a conexão dos jacarés nos mesmos. O efluente é transferido para um decantador com defletor para separar o efluente tratado do lodo gerado.

Figura 8: Detalhamento do reator cilíndrico de fluxo ascendente contínuo (a) Interior do reator EC, (b) Reato EC, (c) Conexão da fonte com os eletrodos.

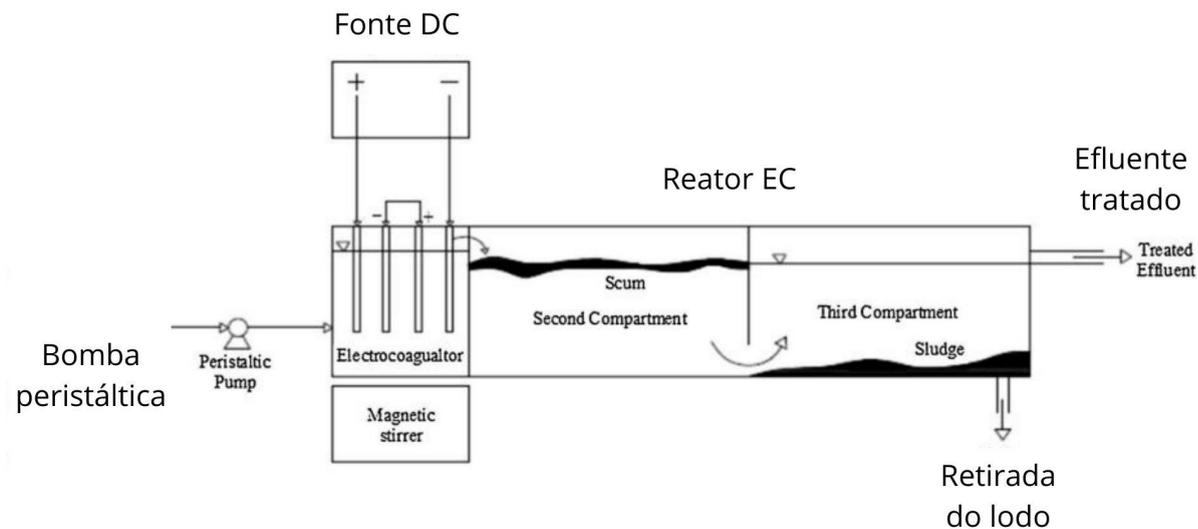


Fonte: Tones (2020).

4.1.1.4 Reator para pós-tratamento de águas residuais municipais

Usando um reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA) esquematizado na Figura 9, Makwana (2016) coletou efluentes de uma planta municipal de tratamento de esgoto em Bamroli, Índia para realizar o pós-tratamento do efluente utilizando o método da eletrocoagulação.

O reator possui três compartimentos acoplados um ao outro conforme a Figura 9, no primeiro ocorre a eletrocoagulação, a água passa para o segundo compartimento onde a espuma é retirada, e no terceiro compartimento, o lodo permanece aglomerado na parte inferior e o efluente tratado é recolhido.

Figura 9: Set-up experimental do reator RAFA

Fonte: Makwana (2016).

4.1.2 Necessidades, Requisitos e Especificações-Meta

A partir da pesquisa bibliográfica e o uso em laboratório, foram elencadas as necessidades para o funcionamento de um reator em fluxo contínuo. Diversos modelos de reatores de eletrocoagulação podem ser desenvolvidos para a aplicação deste método tratamento de efluentes, como se percebeu com os reatores tomados como base, em função disso, as necessidades que o reator desenvolvido deve possuir estão listadas na Tabela 1 para que sejam atendidas.

Tabela 1: Necessidades do reator

Persona de usuário	Necessidades do reator
Nome: Alane Vieira	<ul style="list-style-type: none"> ● Construção em escala de bancada; ● A reação de eletrocoagulação acontece de maneira ininterrupta; ● O produto resultante do tratamento deve ser transferido para outro reservatório; ● A alimentação do reator deve ser contínua; ● É necessário um suporte para os eletrodos; ● Deve ter um dispositivo de agitação do meio reacional
Idade: 23 anos	
Função: Estudante e pesquisadora	

Fonte: Autor (2023).

Em posse das necessidades do reator, essa etapa do projeto consiste em identificar as necessidades do cliente e transformá-las em requisitos, para que as informações possam ser mensuradas visando definir o produto a ser projetado.

Uma “tradução” foi feita com base nas informações coletadas e no passo a passo listado acima. A Tabela 2 mostra as necessidades dos usuários convertidas em especificações de produto.

Tabela 2: Especificações-meta definidas para o produto

Necessidades dos usuários	Requisitos	Especificações	Unidade	Valor-meta
Ser pequeno	Tamanho	Altura, comprimento e largura	mm	500 mm x 150mm x 150 mm
Suporte	Tamanho	Altura, comprimento e largura	mm	100 mm x 10 mm x 3 mm
Agitação	Tamanho ou equipamento	Altura, comprimento e largura ou definição de equipamento	mm ou N/A	Vidro/acrílico
Fonte DC	Voltagem e amperagem	Voltagem e amperagem	V e A	12 V e 12 A
Remoção da espuma e lodo	Tamanho	Altura, comprimento e largura	mm	200 mm x 150 mm x 150 mm

Fonte: Autor (2023).

Os valores-meta das especificações devem ser atingidos nas próximas fases de desenvolvimento do produto. É importante destacar que também há duas necessidades cruciais para esse projeto: “ser de fácil manutenção” e “ser feita de material transparente”. Isso porque o reator será manuseado, inicialmente, por estudantes universitários para testes em laboratório que precisam saber realizar as manutenções de maneira rápida caso o equipamento apresente falhas. É preferível que o reator seja de material transparente como vidro ou acrílico para ser possível observar a eletrocoagulação acontecendo a olho nu.

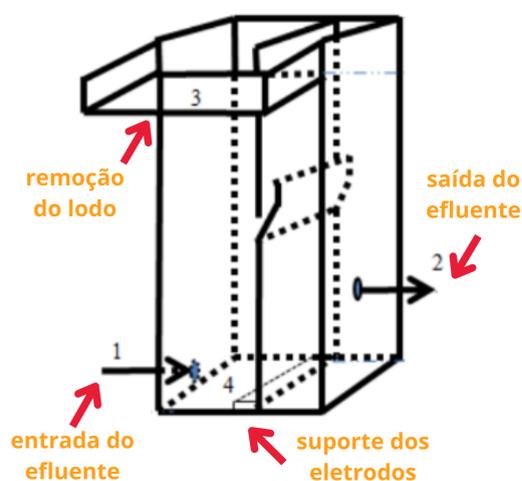
4.2 PROJETO CONCEITUAL

Nesta etapa foi realizada a conceituação do produto levando em consideração o estudo a partir de trabalhos publicados e características obtidas na seção anterior.

Na figura 10 a seguir está um esboço inicial do reator de fluxo contínuo e este foi dividido em subsistemas.

1. Subsistema entrada do efluente (EE)
2. Subsistema saída do efluente (SE)
3. Subsistema remoção do lodo flotado (RL)
4. Subsistema suporte dos eletrodos (S)

Figura 10: Reator de fluxo contínuo ilustrativo com subsistemas identificados nos produtos similares

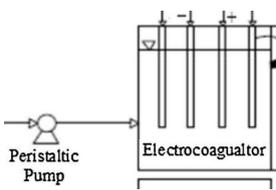


Fonte: Adaptado de Fernandes (2016).

4.2.1 Subsistema Entrada do Efluente (EE)

No que se refere ao subsistema entrada do efluente, é preciso que ele seja um orifício de tamanho certo para a conexão de uma mangueira flexível conectada a uma bomba que irá bombear constantemente o efluente para dentro do reator. De preferência, deve estar localizada na parte inferior do reator, uma vez que o efluente resultante irá subir e não deve ser misturado com o inicial que ainda não passou pelo processo de eletrocoagulação. Para esse subsistema, os conceitos e soluções pesquisadas na fase de Projeto Informacional estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3: Comparativo entre as soluções para o subsistema entrada do efluente

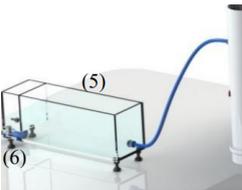
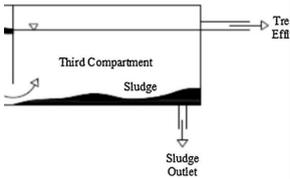
Produto similar	EE	Princípio de solução	Desvantagens
Purificação do biodiesel (EE1)		Orifício inferior lateral com mangueira flexível, permitindo inspeção pelo operador	O material do reator é acrílico e se alguma falha ocorrer é preciso trocar toda a face.
Indústria de laticínios (EE2)		Não há orifícios, a mangueira flexível é colocada dentro do reator pela abertura superior.	A mangueira solta pode escorregar durante o processo, interrompendo o fluxo.
Indústria cosmética (EE3)		Orifício localizado na base vedada do reator suspenso. A posição da mangueira diminui as perdas do sistema.	O reator suspenso pode despencar e amassar a mangueira interrompendo o processo.
Águas residuais municipais (EE4)		Orifício na parte inferior lateral, o efluente é transportado para o reator com o auxílio de uma bomba.	O autor não abordou qual a ferramenta auxiliou o transporte do efluente.

Fonte: Adaptado de Fernandes (2016), Benazzi (2013), Tones (2020), Makwana (2016).

4.2.2 Subsistema Saída do Efluente (SE)

No que se refere ao subsistema saída do efluente, é preciso que ele seja um orifício de tamanho certo para a conexão de uma mangueira flexível ou torneira que tenha contado com um reservatório adjacente para a coleta do efluente tratado. De preferência, deve estar localizada na parte superior do reator, uma vez que o efluente resultante sobe e precisa ser retirado do reator. Para esse subsistema, os conceitos e soluções pesquisadas na fase de Projeto Informacional estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4: Comparativo entre as soluções para o subsistema saída do efluente

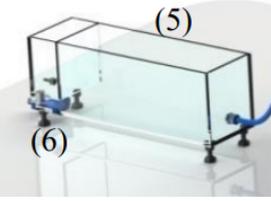
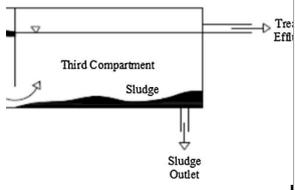
Produto similar	SE	Princípio de solução	Desvantagens
Purificação do biodiesel (SE1)		Uma torneira flexível na parte superior do reator. Quando aberta, o efluente resultante flui para um Becker.	O material do reator é acrílico e se alguma falha ocorrer é preciso trocar toda a face.
Indústria de laticínios (SE2)		Uma mangueira flexível na parte superior de uma face, há uma vedação para não vazar, o produto flui para um Becker.	Não há uma torneira apenas a mangueira, excluindo a possibilidade do operador interromper o fluxo caso necessário.
Indústria cosmética (SE3)		Uma mangueira flexível na parte superior do cilindro,, o efluente é levado a outro reservatório pela gravidade.	O reservatório de armazenamento é uma peça separada que pode encarecer a fabricação do reator
Águas residuais municipais (SE4)		O efluente é levado ao último compartimento, onde decanta e é retirado por um orifício independente.	É preciso definir uma vazão para que o efluente decante e não tenha pausas no sistema.

Fonte: Adaptado de Fernandes (2016), Benazzi (2013), Tones (2020), Makwana (2016).

4.2.3 Subsistema Remoção do Lodo (RL)

Durante o processo de eletrocoagulação é gerado o lodo que contém as impurezas do efluente e o efluente resultante que está livre dessas impurezas, logo, eles precisam ser separados um do outro. Para esse subsistema, as soluções constam na Tabela 5.

Tabela 5: Comparativo entre as soluções para o subsistema remoção do lodo

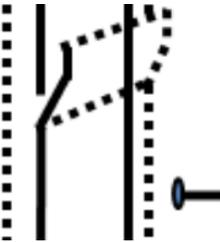
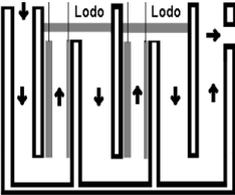
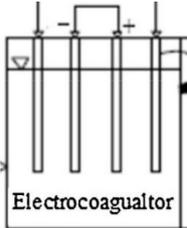
Produto similar	RL	Princípio de solução	Desvantagens
Purificação do biodiesel (RL1)		Uma rampa inclinada a 25° permitindo que o lodo e espuma escoem para uma placa de Petri onde ficam armazenados.	O armazenamento é feito em uma vidraça que mal manuseada pode ser avariada.
Indústria de laticínios (RL2)		Lodo, espuma e efluente ficam misturados, é necessário um segundo processo para separação deles.	É necessário um processo de filtração para separar as sujidades do efluente tratado.
Indústria cosmética (RL3)		No reservatório há um defletor que barra o lodo e a espuma separando-os do efluente tratado.	O efluente é transportado pela gravidade, logo o reservatório precisa estar a um nível abaixo do reator.
Águas residuais municipais (RL4)		Efluente, lodo e espuma estão misturados, o lodo decanta e se aglomera na base sendo retirado por uma abertura em um orifício independente na base.	O tempo de decantação e a remoção da espuma é feita manualmente

Fonte: Adaptado de Fernandes (2016), Benazzi (2013), Tones (2020), Makwana (2016).

4.2.4 Subsistema Suporte dos Eletrodos (S)

No processo de eletrocoagulação os eletrodos que funcionam como cátodo e ânodo não podem estar em contato direto, por isso, faz-se necessário um separador para evitar que essa situação aconteça. Para esse subsistema, as soluções constam na Tabela 6.

Tabela 6: Comparativo entre as soluções para o subsistema suporte dos eletrodos

Produto similar	S	Princípio de solução	Desvantagens
Purificação do biodiesel (S1)		Os eletrodos ficam encaixados e fixos na base do reator, separados por espaçadores isolantes de placas de epóxico.	Desgaste da peça ao longo do tempo, é necessário manutenções periódicas.
Indústria de laticínios (S2)		Os eletrodos estão encaixados em espaços específicos para os mesmos no vidro.	Os eletrodos devem estar sempre no tamanho exato dos espaços, não podem variar.
Indústria cosmética (S3)		Um suporte de <i>nylon</i> mantém fixa a distância entre os eletrodos e impede que eles entrem em contato durante o processo.	É impressa 3D o que encarece o produto.
Águas residuais municipais (S4)		O suporte dos eletrodos é acoplado na carcaça do reator onde os eletrodos são acoplados.	Limita o sistema, os eletrodos precisam ser de um tamanho específico para encaixar perfeitamente nos espaços.

Fonte: Adaptado de Fernandes (2016), Benazzi (2013), Tones (2020), Makwana (2016).

4.2.5 Resultado do Projeto Conceitual

Comparando cada princípio de solução e suas desvantagens, a arquitetura, ergonomia e estética deste projeto podem ser definidas, de maneira a atender os atributos listados acima. Após a realização das análises de cada subsistema, foi montada a matriz morfológica do Projeto Conceitual do desenvolvimento de um reator de fluxo contínuo, tais informações foram agrupadas na Tabela 7.

Tabela 7: Matriz morfológica do Projeto Conceitual

Subsistemas	Princípio de solução			
	EE1	EE2	EE3	EE4
Subsistema entrada de efluente (EE)	EE1	EE2	EE3	EE4
Subsistema saída de efluente (SE)	SE1	SE2	SE3	SE4
Subsistema remoção do lodo (RL)	RL1	RL2	RL3	RL4
Subsistema suporte dos eletrodos (S)	S1	S2	S3	S4

Fonte: Autor (2023).

Essa matriz apresenta as possíveis soluções que o produto desenvolvido pode ter. Visando simplicidade e facilidade de fabricação, os conceitos escolhidos para o projeto estão destacados em verde na Tabela 8 acima. O conceito foi definido como a junção dos quatro subsistemas divididos anteriormente com os princípios de solução destacados na tabela, mas não impede que haja mudanças ou melhorias durante as próximas etapas, essas sendo feitas em base dos princípios de solução dos produtos similares que melhor se adequa ao reator de fluxo contínuo, assim o produto final pode apresentar modificações.

4.3 PROJETO PRELIMINAR

Após o Projeto Informacional e o Projeto Conceitual, faz-se necessário determinar as configurações do produto de maneira a permitir tanto o funcionamento quanto a produção, conforme as especificações-meta apresentadas anteriormente.

A montagem de produtos a partir de módulos tem a vantagem da redução de custo de produção, devido ao volume dos módulos produzidos. Além disso, pode-se terceirizar a produção de determinados módulos, diminuindo o tempo de produção do produto (CARPES JÚNIOR, 2014). No reator de fluxo contínuo projetado, cada subsistema é independente do outro, logo, optou-se por utilizar da **configuração modular** nessa fase do projeto, de maneira a facilitar o desenvolvimento do produto, já visando futuras melhorias nas configurações do mesmo, onde apenas o módulo específico será otimizado.

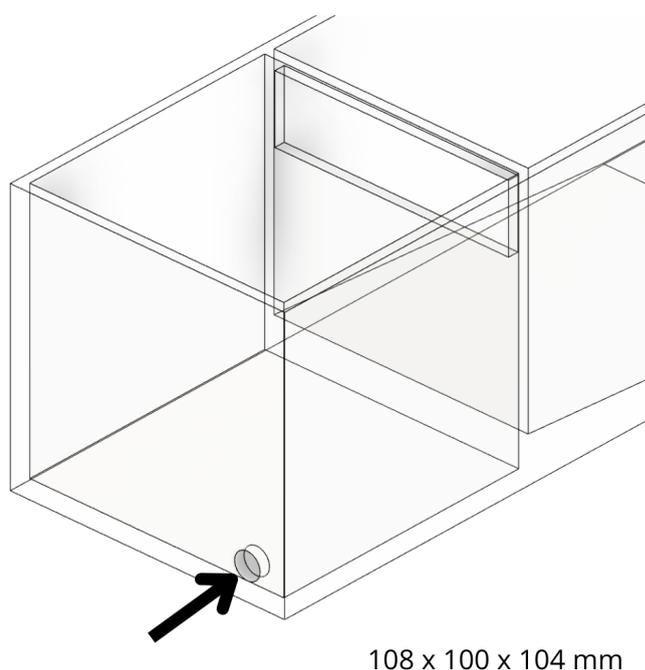
Com os princípios de solução para cada subsistema definido, como observado na Tabela 8, foi efetuado um esboço de cada módulo determinado com suas devidas dimensões preliminares, materiais definidos e possíveis adaptações em relação aos princípios de soluções pré-estabelecidas.

4.3.1 Configuração 1 do Produto

4.3.1.1 Esboço do subsistema entrada de efluente

Conforme estabelecido no Projeto Conceitual, o princípio de solução para o módulo entrada de efluente foi EE1, manter o fluxo contínuo enquanto ocorre o processo de eletrocoagulação e permitindo que o efluente contaminado entre no reator sem se misturar diretamente. No contexto desse projeto, para atender as especificações-meta, propõe-se a adaptação mostrada na Figura 11.

Figura 11: Adaptação de EE1 para o projeto



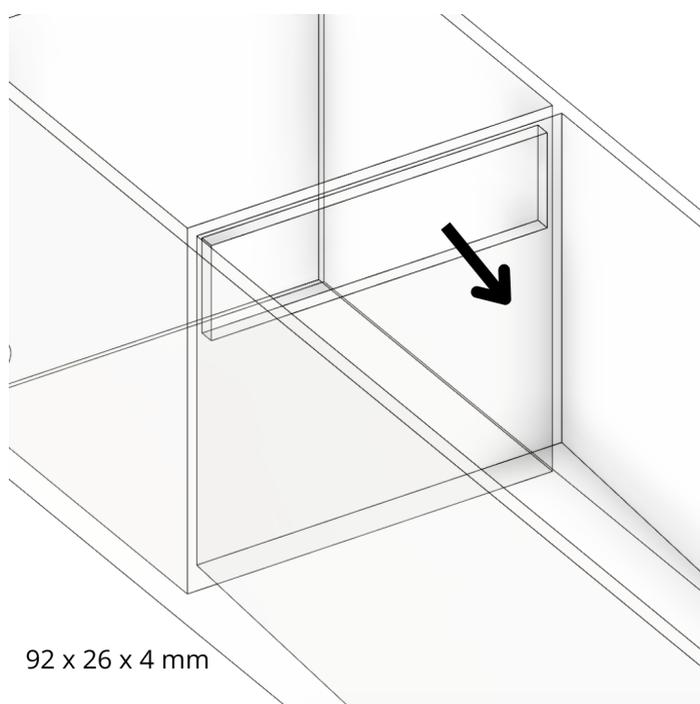
Fonte: Autor (2023).

A adaptação proposta na Figura 11 conserva o princípio de funcionamento de EE1, porém o orifício de entrada possui um diâmetro de 10 mm.

4.3.1.2 Esboço do subsistema saída de efluente

Partindo do mesmo princípio do tópico anterior, a adaptação do subsistema saída de efluente conserva o princípio de funcionamento de SE4, com um orifício de 10 mm de diâmetro que será conectado a uma mangueira com uma válvula e o efluente tratado será armazenado em um Becker. A Figura 12 apresenta esse esboço.

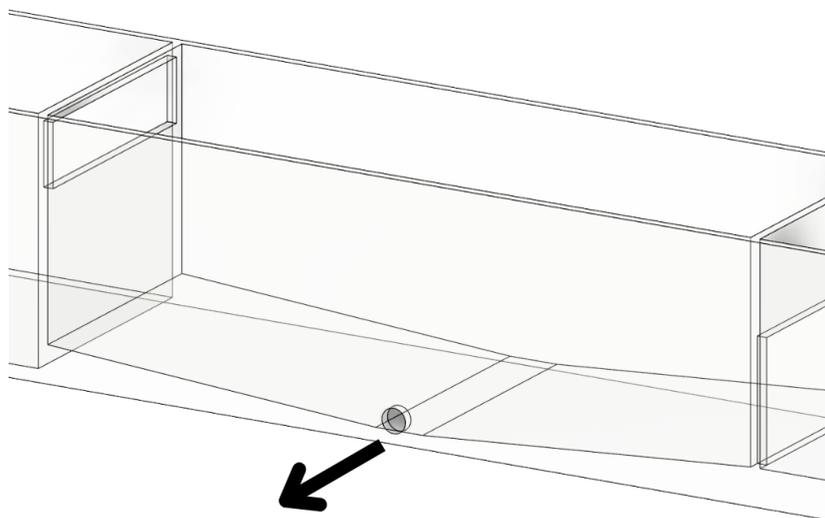
Figura 12: Adaptação de SE1 para o projeto



Fonte: Autor (2023).

4.3.1.3 Esboço do subsistema remoção do lodo

O princípio de solução escolhido para o módulo remoção do lodo foi o RL3. No contexto desse projeto, visando atender às especificações-meta, propõe-se a adaptação mostrada na Figura 13.

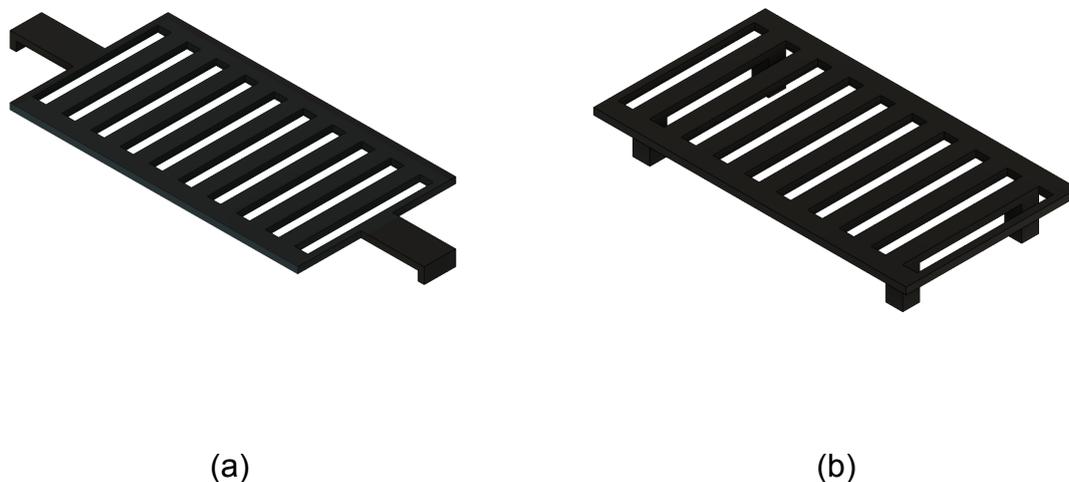
Figura 13: Adaptação de RL1 para o projeto Φ 10 mm**Fonte:** Autor (2023).

Depois da eletrocoagulação acontecer, o material irá ser transportado para um compartimento acoplado por meio do transbordamento do reator. O lodo por sua vez vai decantar e fica aglomerado na base que possui um furo que permite a retirada do mesmo com o auxílio de uma torneira.

4.3.1.4 Esboço do subsistema suporte dos eletrodos

Para esse subsistema, o princípio escolhido foi o S3. No contexto do projeto e procurando uma fabricação mais simples, ao invés de *nylon*, o suporte é dividido em duas peças, a inferior fica apoiada na base do reator e a superior fica encaixada na parte superior, ambas foram impressas em impressora 3D no filamento ABS. Essa configuração, Figura 14, permite que os eletrodos não fiquem totalmente submersos no efluente, pois é preciso ligar os jacarés da fonte na parte superior das placas de alumínio.

Figura 14: Adaptação de S3 para o projeto. (a) Suporte superior, (b) Suporte inferior

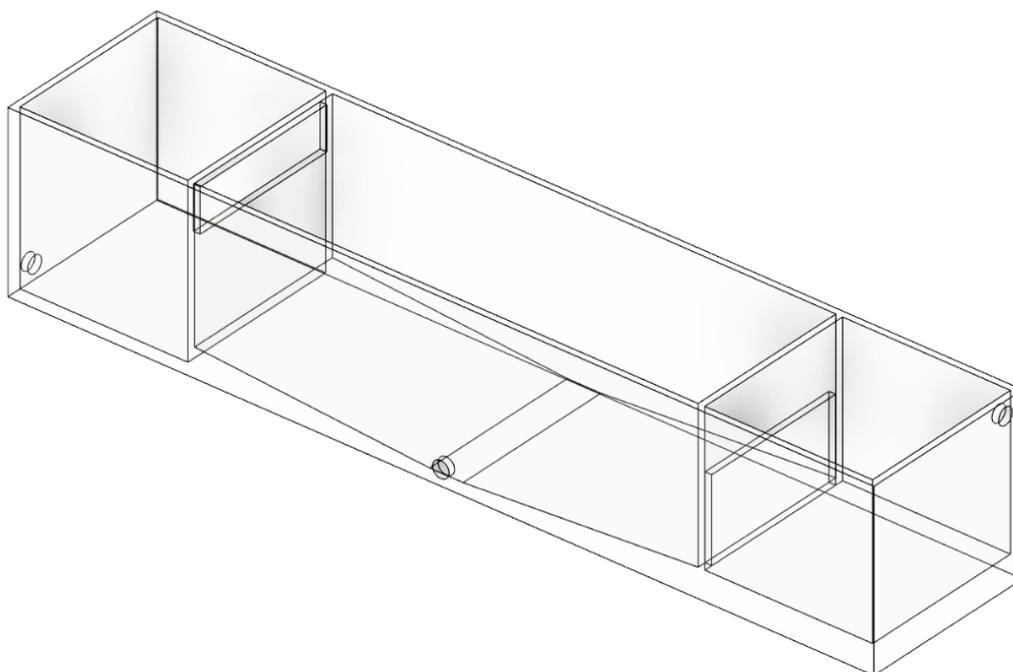


Fonte: Autor (2023).

A adaptação proposta conserva o princípio de funcionamento do subsistema pré-estabelecido apenas em ser uma peça separada.

4.3.2 Carcaça

A carcaça do reator também foi dimensionada e é apresentada na Figura 15. É uma peça única dividida em três compartimentos diferentes onde cada fase do processo irá acontecer. No primeiro compartimento é onde ocorre a entrada contínua do efluente com o auxílio de uma bomba e também onde são inseridos os dois suportes do eletrodo para que a eletrocoagulação aconteça. Seguindo o fluxo, o efluente é transportado para o compartimento 2 pelo transbordamento do anterior, este possui uma inclinação de 94° para que os flocos e lodo possam se aglomerar no fundo e decantar, para que o efluente que vai para o compartimento 3, que possui um barramento para evitar que a espuma passe, esteja limpo e livre de impurezas. O terceiro e último setor também possui um furo que permite a adição de uma torneira que permite a retirada do produto final.

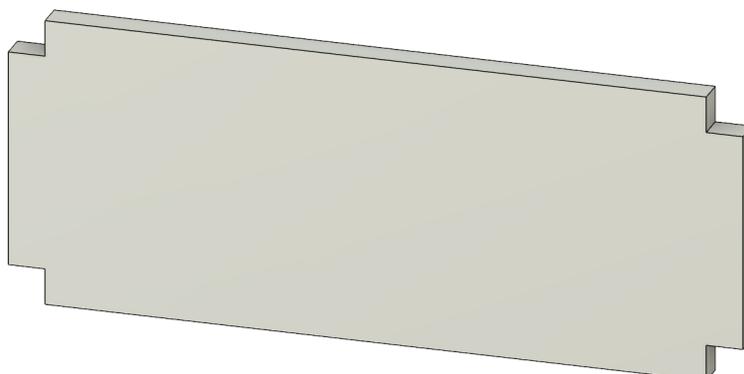
Figura 15: Carcaça do reator

308 x 108 x 104 mm

Fonte: Autor (2023).

4.3.3 Eletrodo

A eletrocoagulação não ocorre se não houver os eletrodos. Para a remoção das impurezas dos efluentes saneantes domissanitários, o material utilizado para os eletrodos foi chapa de alumínio com 100 mm x 45 mm x 3 mm de dimensão. Foram realizados cortes com o auxílio de uma fresadora, visto na Figura 16, para que o mesmo pudesse ser encaixado nos suportes e também sobrasse espaço efetivo para que os jacarés da fonte fossem ligados.

Figura 16: Eletrodo

Fonte: Autor (2023).

4.3.4 Processos de Fabricação

A carcaça do reator é feita de acrílico com 4 mm de espessura, é dividida em três compartimentos diferentes onde acontecem cada etapa do processo de eletrocoagulação até a retirada do efluente limpo. O primeiro compartimento é onde ocorre a eletrocoagulação de fato, é alimentado por uma bomba e uma mangueira acoplada no reator por um furo na parte inferior da lateral esquerda de diâmetro \varnothing 10 mm, suas dimensões são 100 mm x 100 mm x 100 mm.

O material do compartimento 1 é transferido para o segundo compartimento pelo transbordamento do primeiro por uma abertura com dimensões 92 mm x 26 mm. A base possui uma inclinação de 5° que permite que o efluente decante e as sujidades se aglomerem na base do compartimento para serem retiradas com o auxílio de um furo de \varnothing 10 mm e uma torneira acoplada na face frontal da carcaça do reator.

E, por fim, um barramento de 50 mm x 90 mm divide o segundo do terceiro compartimento e impede que alguma das impurezas que não decantam, sejam misturadas com o efluente tratado. A terceira divisória possui dimensões 100 mm x 100 mm x 90 mm e também um furo de \varnothing 10 mm na parte superior lateral direita que permite a conexão com uma mangueira ou torneira para retirada do material ao final do processo.

O suporte foi impresso em impressora 3D com filamento ABS (acrilonitrila butadieno estireno), o mesmo possui divisórias de para o encaixe de até 10

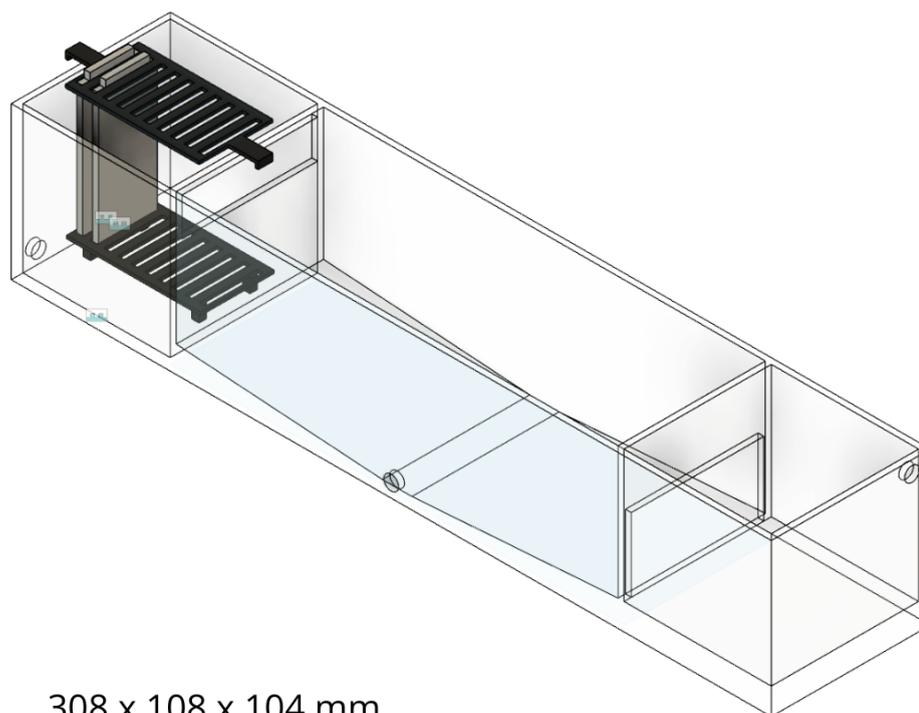
eletrodos de alumínio, essas podem ser feitas com o auxílio de uma fresadora. Para o encaixe dos eletrodos nos suportes, quatro cortes 5 mm x 5 mm foram feitos nas placas de alumínio de 90 mm x 40 mm x 4 mm também com o auxílio de uma fresadora.

As mangueiras flexíveis e torneiras que se conectam aos furos de entrada e saída são compradas com o mesmo diâmetro do seu respectivo furo.

4.3.5 Montagem do Produto

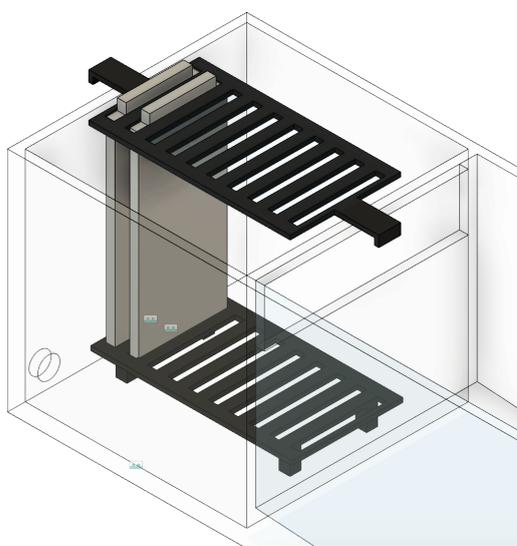
Com o auxílio da metodologia de fases, foi possível chegar em uma geometria que satisfizesse as necessidades da persona criada para ser a usuária desse reator, como também as necessidades e especificações-meta. O produto, dividido em carcaça, suporte superior e inferior de eletrodos, e eletrodos, está montado na Figura 17.

Figura 17: Montagem do Reator (a) Visão geral, (b) Visão focada na primeira câmara com os suportes.



308 x 108 x 104 mm

(A)



(B)

Fonte: Autor (2023).

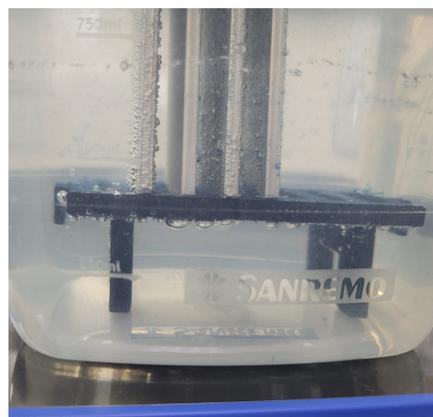
4.3.6 Suporte Impresso

Com o auxílio de uma impressora 3D o suporte para os eletrodos foi impresso e as placas de alumínio foram cortadas nas especificações definidas e especificadas neste projeto. Tendo ambos em mãos foi possível testar o encaixe e o apoio do suporte em uma superfície plana. As fotos desse experimento podem ser vistas na Figura 18.

Figura 18: Suporte e encaixe dos eletrodos. (a) Suporte impresso, (b) Eletrodos encaixados no suporte.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2023).

4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os suportes dos eletrodos foram impressos e os eletrodos foram cortados para testar o encaixe das peças, que ocorreu de maneira satisfatória. Tanto o suporte quanto os eletrodos foram submetidos a um teste de eletrocoagulação improvisado, uma vasilha plástica de 1,5 L serviu como reator e o efluente testado foi a água destilada.

O tratamento durou 30 minutos com o meio reacional sendo agitado com o auxílio de um agitador eletromagnético. O resultado foi o esperado em comparação a outros testes realizados no laboratório anteriormente. O efluente gerou espuma que foi retirada manualmente e o pH do efluente tratado ficou neutro.

Por condições financeiras, o reator desenvolvido neste trabalho não foi produzido, por esta razão o mesmo não foi testado em laboratório e validado.

5. CONCLUSÕES

Utilizando pesquisas bibliográficas para a compreensão do funcionamento da técnica de eletrocoagulação, como o reator de fluxo contínuo funciona e quais as características que compõem o mesmo. Métodos de desenvolvimento de produto e modelagem tridimensional foram utilizados para a criação deste reator de fluxo contínuo e também para documentar seu detalhamento técnico.

O objetivo de projetar um reator de fluxo contínuo foi devidamente finalizado. A princípio esse projeto auxiliará na continuação das pesquisas no LATECLIM - UFPE.

Limitando-se às três fases do projeto, o reator teve seu conceito e dimensionamento definidos, e os suportes para os eletrodos fabricados, e as placas de alumínio para os eletrodos foram cortadas, mas a carcaça do reator não foi construída pois não fazia parte do escopo do presente trabalho que tinha como o objetivo apenas o dimensionamento.

O projeto possui potencial para ser expandido para as demais fases do desenvolvimento do produto, como processo de manufatura para fabricação total de todas as peças e testes de produto para validação.

6.1 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1. Fabricação do reator para ser testado no LATECLIM nas próximas etapas do desenvolvimento da iniciação científica;
2. Desenvolver um método de automatização da retirada da espuma acumulada na segunda câmara ao invés de fazê-lo manualmente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLA. Associação Brasileira das Indústrias de Produtos de Higiene, Limpeza e Saneantes de Uso Doméstico e de Uso Profissional. Setor de saneantes cresce 170% em 15 anos, no Brasil. Disponível em <<https://abipla.org.br/setor-de-saneantes-cresce-170-em-15-anos-no-brasil/#:~:text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20desinfetantes%20teve,de%20litros%2C%20no%20ano%20passado>>. Acesso em Janeiro de 2023.

AITYOUB, Abdelaaziz et al. Optimization of physicochemical parameters during the electrocoagulation cadmium elimination. *Journal of chemistry*, v. 2020, p. 1-12, 2020. Disponível em <<https://doi.org/10.1155/2020/3071420>>. Acesso em Novembro de 2022.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Usos da água. Disponível em <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/usos-da-agua>>. Acesso em Janeiro de 2023.

ANVISA. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. RESOLUÇÃO Nº 336, DE 22 DE JULHO DE 1999. Disponível em <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/1999/res0336_22_07_1999.html>. Acesso em: Maio de 2023.

ASSALIN, Márcia Regina; DURÁN, Nelson. Novas tendências para aplicação de ozônio no tratamento de resíduos: ozonização catalítica. *Analytica*, São Paulo, n.26, p.76-86, 2007. Disponível em <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/15917/1/2007AP041.pdf>>. Acesso em: Janeiro de 2023.

ASWATHY, P. et al. Removal of organics from bilge water by batch electrocoagulation process. **Separation and Purification Technology**, v. 159, p. 108-115, 2016. Disponível em <<http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.01.001>>. Acesso em: Janeiro de 2023.

BENAZZI, Toni Luis. Otimização de um sistema de eletrofloculação em fluxo contínuo para o tratamento de efluentes líquidos das indústrias de laticínios. 2013.

Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, Brasil, 2013.

BRAHMI, K. et al. Investigation of electrocoagulation reactor design parameters effect on the removal of cadmium from synthetic and phosphate industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, Elsevier BV, v. 12, n. 8, p. 1848–1859, dez. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.12.012>>. Acesso em Novembro de 2022.

CAROLI, Paulo. *Lean inception: Como Alinhar Pessoas e Construir o Produto Certo*. 1ª ed. atualizada - São Paulo: Editora Carol, 2018.

CARPES JR, Widomar P. *Introdução ao projeto de produtos* - Porto Alegre: Bookman, 2014.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, v. 38, n. 1, p. 11–41, 2004. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>>. Acesso em Novembro de 2022.

DARBAN, A. et al. A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion in Electrochemistry*, v. 22, p. 154–169, ago. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.05.009>>. Acesso em Novembro de 2022.

FERNANDES, T. de F.; SOUZA, C. C. da N.; ALEXANDRE, G. B.; SILVA, J. N. Estudo e Monitoramento Tecnológico do Tratamento de Efluentes por Eletrocoagulação. *Cadernos de Prospecção, [S. l.]*, v. 12, n. 2, p. 388, 2019. DOI: 10.9771/cp.v12i2.27286. Disponível em <<https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/view/27286>>. Acesso em Janeiro de 2023.

FERNANDES, T. de F.; et al. Avaliação de um reator de fluxo contínuo para eletrofloculação do efluente da purificação do biodiesel. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2016.

FINGER, Amanda et al. Avaliação e eficiência do tratamento físico químico de efluente pela técnica de eletrocoagulação com diferentes eletrólitos suportes. 2018. 66 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Cuiabá, 2018.

FLORES, Omar J. et al. Arsenic removal from groundwater by electrocoagulation in a pre-pilot-scale continuous filter press reactor. *Chemical Engineering Science*, v. 97, p. 1-6, 2013. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.04.029>>. Acesso em Novembro de 2022.

GARCIA-SEGURA, Sergi et al. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, v. 801, p. 267-299. 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>>. Acesso em Novembro de 2022.

GONZALEZ, João Carlos Soalheiro. Estruturando O Processo De Desenvolvimento Do Produto Através Do Apqp Da Qs 9000. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D'Oeste, 1999.

GUARNIERI, Amanda Cristina. Tratamento de efluentes de produtos domissanitários. 2013. p.72. Monografia (Química Industrial) - Fundação Educacional do Município de Assis - FEMA - Assis, 2013.

KABDAŞLI, I. et al. Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review. *Environmental Technology Reviews*, v. 1, n. 1, p. 2-45, 2012. Disponível em <<https://doi.org/10.1080/21622515.2012.715390>>. Acesso em Janeiro de 2023.

KRYSTYNIK, Pavel; TITO, Duarte Novaes. Key process parameters affecting performance of electro-coagulation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 117, p. 106-112, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.03.022>>. Acesso em Dezembro de 2022.

LÓPEZ-GUZMÁN, Miriam; FLORES-HIDALGO, Manuel Alberto; REYNOSO-CUEVAS, Liliana. Electrocoagulation process: an approach to continuous

processes, reactors design, pharmaceuticals removal, and hybrid systems—a review. *Processes*, v. 9, n. 10, p. 1831, 2021. Disponível em <<https://doi.org/10.3390/pr9101831>>. Acesso em Janeiro de 2023.

MAKWANA, Abhipsa R.; AHAMMED, M. Mansoor. Continuous electrocoagulation process for the post-treatment of anaerobically treated municipal wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 102, p. 724-733, 2016. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.005>>. Acesso em Novembro de 2022.

MARCHESAN, Luciane. Tratamento de efluentes de lavanderia pela técnica de eletrocoagulação-flotação visando o reuso. 2022. Monografia (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2022. Acesso em Maio de 2023.

MENESES, Janaina Moreira. TRATAMENTO DO EFLUENTE GERADO NA PRODUÇÃO DE BIODISEL UTILIZANDO A ELETROCOAGULAÇÃO/FLOTAÇÃO. Campina Grande. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2011.

MÓDENES, Aparecido Nivaldo et al. Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, p. 571-578, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/S1413-4152201775999>>. Acesso em Novembro de 2022.

MODIRSHAHLA, N.; BEHNAJADY, M. A.; MOHAMMADI-AGHDAM, S. Investigation of the effect of different electrodes and their connections on the removal efficiency of 4-nitrophenol from aqueous solution by electrocoagulation. *Journal of Hazardous materials*, v. 154, n. 1-3, p. 778-786, 2008. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.120>>. Acesso em Dezembro de 2022.

MOLLAH, M. et al. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, v. 114, n. 1-3, p. 199–210, 2004. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>>. Acesso em Novembro de 2022.

MOUSSA, D. T. et al. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, v. 186, p. 24–41, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032>>. Acesso em Novembro de 2022.

NAJE, A. S. et al. Electrocoagulation using a rotated anode: A novel reactor design for textile wastewater treatment, v. 176. p. 34-44, 2016. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.034>>. Acesso em Novembro de 2022.

PALAHOUANE, B.; DROUCHEA, N.; AOUDJA, S.; BENSADOKB, K. Cost-effective electrocoagulation process for the remediation of fluoride from pretreated photovoltaic wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 22, p. 127 – 131, 2015. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.06.033>>. Acesso em Novembro de 2022.

PERTILE, Taís Sabedot et al. ESTUDO SOBRE OS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA GALVÂNICA. 2013. Disponível em <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/1763f62893966765d2d3f221320d1de4_ef25c8380f7aae13fe17288062c67009.pdf>. Acesso em Novembro de 2022.

PERTILE, Taís Sabedot. AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO APLICADO A EFLUENTES CIANÍDRICOS DA INDÚSTRIA GALVÂNICA. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias) - Universidade de Caxias do Sul, Centro de Ciências Exatas e Tecnologias, Caxias do Sul, 2014.

PINHEIRO, Aline Martins et al. Pós-tratamento de efluente saneante domissanitário por ozonização convencional e catalítica. 2014. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

RAMALHO, Adriana Margarida Zanbotto. Estudo de reatores eletroquímicos para remoção de Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fenol e BTEX em água produzida. 2008. 87 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

RANGEL, Herllaine de Almeida; MERÇON, Fábio. Estudo da emissão por fluorescência de ultravioleta na quantificação de um inibidor de corrosão do tipo sal de amônio quaternário em água. *Química Nova*, v. 35, p. 1287-1293, 2012. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000700002>>. Acesso em Novembro de 2022.

ROZENFELD, Henrique et al. *Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo*. 1ª ed. São Paulo, SP: Saraiva, 2010.

SILVA, FDM. *O CAD Aplicado ao Projeto do Produto: O Ponto de Vista dos Designers Industriais*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

TAKAHASHI, S. & TAKAHASHI, V. P. *Gestão de inovação de produtos: estratégia, processo, organização e conhecimento*. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2007.

THEODORO, Paulo Sérgio et al. *Utilização da eletrocoagulação no tratamento de efluente da indústria galvânica*. 2010. 136 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos) - Universidade Federal do Oeste do Paraná, Toledo, 2010.

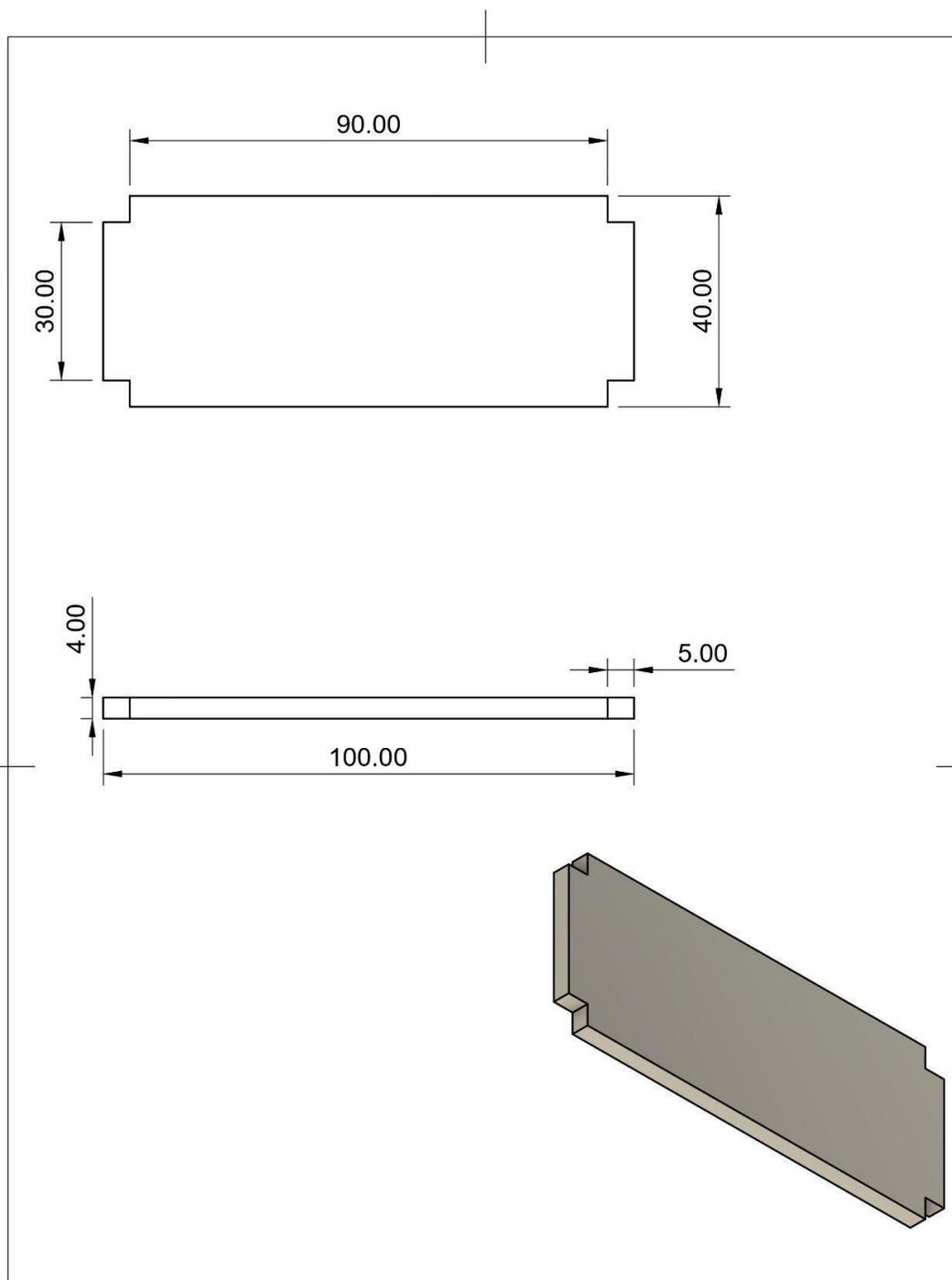
TONES, Aline Raquel Müller. *Tratamento do efluente de indústria cosmética por eletrocoagulação em reator eletroquímico cilíndrico em fluxo ascendente contínuo*. 2020. 107 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2020.

VASCONCELOS. A. L. *Eletroquímica Aplicada na Degradação de Substâncias Orgânicas Presentes em Soluções Aquosas*. 2002. 54f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2002.

WALSH, F., TRINIDAD, P.; *Expresión for Electrochemical Reactors which operate under mass transport controlled reaction conditions, Part I: Batch Reactor, PFR and CSTR*. *Int. J. Engng.*, v. 14, n. 6, 1998. Disponível em <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6575115>>. Acesso em Novembro de 2022.

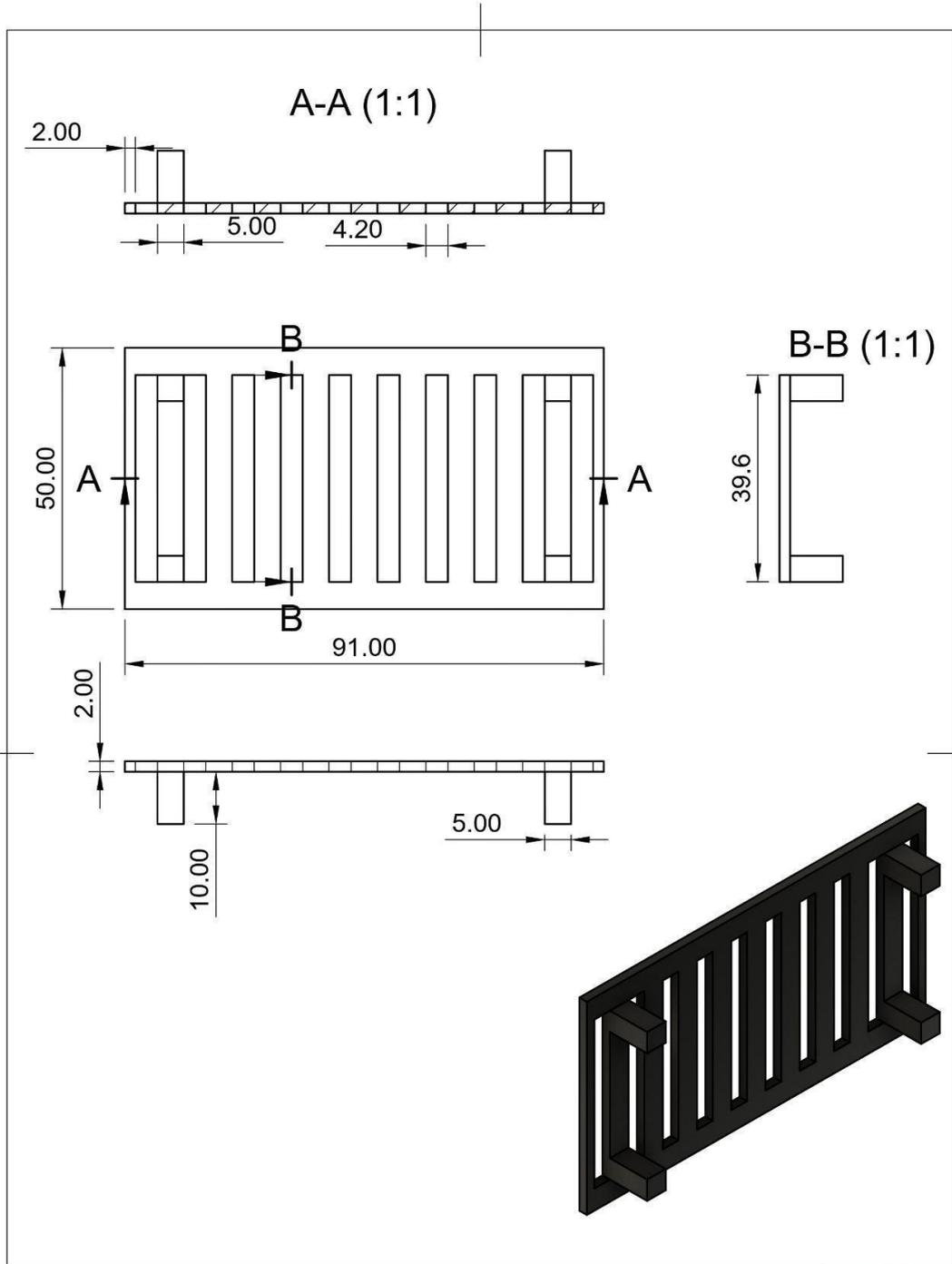
ZODI, S.; MERZOUK, B.; POTIER, O.; LAPICQUE, F.; LECLERC, J.P.. Direct red 81 dye removal by a continuous flow electrocoagulation/flotation reactor, Sep. Purif. Technol, v. 108, p. 215–222, 2013. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.01.052>>. Acesso em Novembro de 2022.

APÊNDICE A



Título: ELETRODO		
Autor: Alane Vieira Gomes	Unidades: mm	
Projeto: Trabalho de Conclusão de Curso	Material: Alumínio	
Data: 07/06/2023	Escala: 1:1	

APÊNDICE B



Título: Suporte Inferior		
Autor: Alane Vieira Gomes	Unidades: mm	
Projeto: Trabalho de Conclusão de Curso	Material:	
Data: 07/06/2023	Escala: 1:1	
		Folha: 1/1

APÊNDICE C

